



## Projeto aerogeofísico São Timóteo (província uranífera de Lagoa Real – Ba): grandezas dosimétricas e estimativa das concentrações de U e Th.

Esaú Francisco Sena Santos<sup>1</sup>, Francisco Fernando Lamego Simões Filho<sup>2</sup> e Jean Marie Flexor<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Radioproteção e Dosimetria – CNEN/MCT, Programa de Pós-graduação, Rio de Janeiro (RJ): [esau@ird.gov.br](mailto:esau@ird.gov.br)

<sup>2</sup> Instituto de Radioproteção e Dosimetria – CNEN/MCT, Rio de Janeiro (RJ): [flamego@ird.gov.br](mailto:flamego@ird.gov.br)

<sup>3</sup> Observatório Nacional – ON/MCT, Coordenadoria de Geofísica, Rio de Janeiro (RJ): [flexor@on.br](mailto:flexor@on.br)

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Uranium and thorium concentrations (*ppm eU* and *ppm eTh*) obtained from the gamma-ray spectrometry airborne survey of the São Timóteo Project (uraniferous province of Lagoa Real - Bahia, Brazil, CNEN, 1979) has been compared with terrestrial data concentrations measured by the "Environmental Monitoring Program (EMP)" carried out during the years 1998-2003 in the same area. This comparison allowed establishing correction factors for determination of the sensitivity coefficients used to convert to exposure rate the total count data (CT channel - cps) measured during the airborne survey. Following this correction, it was possible to determine the radiation dose absorbed in the air ( $D_{air}$ ), assuming that is equivalent to the exposure ( $X$ ) in the so-called "charged particles equilibrium conditions". The results showed that the concentration of U and Th derived by the airborne survey has a distribution that is comparable to the activities measured by the Environmental Monitoring Program.

### Introdução

Levantamentos aerogeofísicos utilizando espectrometria gama iniciaram-se em meados de 1940 para pesquisar ocorrências de urânio. A espectrometria-gama aérea tem sido utilizada para apoio ao mapeamento geológico e para a prospecção de jazidas minerais onde o urânio é um elemento associado, como o Au, por exemplo. Aplicações ambientais do método iniciaram-se com o mapeamento das precipitações radioativas produzidas nos testes termonucleares atmosféricos, acumulação de radônio em habitações, no monitoramento de contaminações por elementos radioativos dispersados no meio ambiente por acidentes em centrais nucleares bem como no rastreamento de fontes radioativas artificiais utilizadas na medicina e na indústria. Mais recentemente, as aplicações do método se ampliaram para incluir o mapeamento de solos e, com o uso de modelos digitais de terreno, obter um melhor entendimento dos processos hidrogeológicos que controlam a distribuição dos radioelementos e sua relação com processos de descarga e recarga dos aquíferos (IAEA, 2003).

No Brasil, a partir 1953, iniciaram-se os levantamentos aerogeofísicos, que envolviam, freqüentemente, além da aquisição de dados magnetométricos, também dados radiométricos (Hildebrand, 2004). Anomalias radioativas detectadas anteriormente na província uranífera de Lagoa Real (Caetité, Bahia) conduziram à realização, em 1979, do Projeto São Timóteo, levantamento aerogeofísico de dados radiométricos e magnetométricos cobrindo uma área de 4600 km<sup>2</sup> (42°30' - 42°00' W e 14°15' - 13°30' S) (fig.1). Este levantamento confirmou a existência de várias ocorrências importantes de U. Nesta região, localiza-se, atualmente, a Unidade de Concentração de Urânio – URA (instalações de mineração e beneficiamento de urânio das Indústrias Nucleares Brasileiras – INB), que mantém um Programa de Monitoração Ambiental (PMA) com vários pontos de amostragem onde são medidas as concentrações de radionuclídeos e suas respectivas taxas de dose absorvida no ar em várias matrizes ambientais. Neste estudo, foram utilizados dados de concentração de U e Th e de taxa de dose absorvida no ar extraídos dos relatórios do PMA da URA, entre os anos de 1998 e 2003. Este trabalho procurou estimar tanto a exatidão das concentrações de U e Th, como da taxa de dose absorvida no ar, comparando dados aéreos com os dados terrestres do Programa de Monitoração Ambiental.

### Grandezas Dosimétricas no ar

A *exposição* ( $X$ ) é uma medida da ionização por unidade de massa,  $dQ/dm$ , onde  $dQ$  representa o valor absoluto das cargas produzidas pela radiação gama completamente freadas no ar. No SI, esta medida é expressa em C/kg ou Röentgen ( $2,58 \cdot 10^{-4}$  C/kg). A *dose de radiação absorvida* ( $D$ ) é dada por  $dE/dm$  onde  $dE$  é a energia média dissipada pela radiação gama por unidade  $dm$  de massa do ar. A unidade, no SI, é dada por J/kg, também chamada de Gray (Gy). Utiliza-se ainda, o rad (1 Gy = 100 rad). Para fins de comparação, utiliza-se a grandeza KERMA ( $K$ ) – acrônimo de "Kinetic Energy Released in Material" – quociente  $dE_{tr}$  por  $dm$ , onde  $dE_{tr}$  é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa  $dm$ . Essa grandeza, no SI, é medida em Gy. KERMA, Exposição e Dose absorvida estão relacionadas entre si quando ocorre a situação de *Equilíbrio de Partículas Carregadas* (EPC), ou seja, satisfazem as seguintes condições: a) a composição atômica e a densidade do meio são homogêneas; b) existe um campo uniforme de radiação indiretamente ionizante e c) não existem campos

elétricos ou magnéticos de natureza não homogênea (Attix, 1986). No caso do ar, a equivalência entre KERMA, Dose absorvida e Exposição é expressa pela seguinte relação:

$$D_{ar}^{EPC} = 0,876 X_{ar}^{EPC} = K_{ar} \quad (1)$$

## Metodologia

Isótopos de elementos radioativos naturais emitem raios gama, sendo que os mais intensos são o  $^{214}\text{Bi}$ , o  $^{208}\text{Tl}$  e o  $^{40}\text{K}$ . O  $^{214}\text{Bi}$  (1,76 MeV) provém do decaimento do  $^{238}\text{U}$ , sendo uma indicação de concentração de Urânio. O  $^{208}\text{Tl}$  (2,61 MeV) provém do decaimento do  $^{232}\text{Th}$  sendo um indicador do teor de Tório e o  $^{40}\text{K}$  (1,46 MeV) é um isótopo radioativo do Potássio, que corresponde a 0,012% do seu teor total em rochas e solos. Como esta fração permanece aproximadamente constante até mesmo durante os processos de intemperismo e de metamorfismo, a radiação gama é boa indicadora de variação do teor em K nas rochas. A hipótese de equilíbrio secular para os produtos de decaimento das séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  é assumida. Entretanto, de maneira mais marcante para a série do  $^{238}\text{U}$ , o equilíbrio radioativo é mais uma exceção do que uma regra. É o que ocorre em processos superficiais – aplicações ambientais – onde o equilíbrio da série pode ser rompido na altura do  $^{234}\text{U}$  e do  $^{226}\text{Ra}$  assim como pela emissão de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) no solo. Para este tipo de aplicação, estes efeitos devem ser levados em conta, de modo a corrigir os dados dos aerolevantamentos (as concentrações são expressas em ppm eU, ppm eTh e % K). Isto pode ser abordado através de medidas da radioatividade em amostras terrestres por espectrometria alfa, espectrometria de massa ou por espectrometria gama de alta resolução (detectores HPGe) onde o desequilíbrio radioativo pode ser estimado através de razões tais como  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ .

O levantamento aerogeofísico do Projeto São Timóteo, está descrito em <http://www.cprm.gov.br>: trata-se do projeto 2029 da “Série 2000” – projetos conduzidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pela Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (NUCLEBRÁS). Os dados cedidos para este trabalho foram fornecidos sob a forma de percentagem (%) para o K, parte por milhão de equivalente Urânio (ppm eU), parte por milhão de equivalente Tório (ppm eTh) e em microröntgen por hora ( $\mu\text{R.h}^{-1}$ ) para o Canal de Contagem Total. É importante lembrar que no Projeto São Timóteo, os dados radiométricos foram adquiridos sob a forma de contagens por segundo (cps) para os canais do U, Th, K e CT tendo sido, em 1995, transformados em concentração e taxa de exposição utilizando técnicas de reproprocessamento das linhas de vôo e o método da “retocalibração” (Grasty R.L. *et. al.*, 1991). Para esta transformação utilizaram-se os coeficientes de sensibilidade para cada canal, estabelecidos durante o Brazil Airborne Radiometric Mapping Project (BARMP), mostrados na tab.1 (BARMP, 1997). Estes coeficientes quando aplicados na eq.2, concomitantemente com as taxas de contagem do canal utilizado, geram os valores de concentração (canais: K, U e Th) ou da taxa de exposição (canal: Contagem Total).

$$C = N / S \quad (2)$$

onde  $C$  é a concentração (%K, ppm eU ou ppm eTh) ou a taxa de exposição ( $\mu\text{R.h}^{-1}$ ),  $N$  é a taxa de contagem (cps) do canal (K, U, Th ou CT) e  $S$  é o coeficiente de sensibilidade de cada canal.

Imagens georeferenciadas de isovalores para as concentrações de K, U e Th foram construídas após se chegar aos valores de concentração de K, U e Th utilizando-se a eq.2. Entretanto para se chegar a taxa de dose absorvida no ar utilizou-se secundariamente a eq.1, que possibilitou a transformação dos dados de taxa de exposição (oriundos do canal de Contagem Total) para taxa de dose absorvida no ar.

Os dados de concentração de U e Th foram comparados em seis pontos de amostragem (1, 8, 10, 13, 42 e 46) (fig.2). Foi utilizado o valor médio das medidas realizadas no PMA, durante o período de 1998-2003, para estabelecer a comparação com as concentrações obtidas no levantamento aerogeofísico. Para isto foi utilizado um valor médio nas imagens das concentrações de U e Th num raio de cerca de 50 m ao redor dos “pixels” georeferenciados de coordenadas correspondentes aos pontos de amostragem do PMA. As concentrações de U e Th em solos, com diferentes tipos de cobertura vegetal, foram determinadas através de análises radioquímicas. Já as medidas de taxa de dose absorvida no ar foram comparadas em 13 pontos (1, 5, 7, 8, 9, 10, 13, 41, 42, 43, 44, 46 e 299) (fig.2). Utilizou-se um valor médio das medidas de taxa de dose absorvida no ar, do PMA da URA, em cada ponto. Estas medidas foram obtidas com a utilização de dosímetros termoluminescentes (TLDs) localizados nos pontos de amostragem posicionados a um metro do solo. Para os dados de taxa de dose provenientes do levantamento aerogeofísico do Projeto São Timóteo utilizou-se a mesma metodologia empregada para os dados de concentração inerentes a espectrometria-gama aérea para que se obtivesse um valor médio representativo das medidas da área analisada.

## Resultados e Discussão

As concentrações de U e Th são apresentadas respectivamente nas fig.3 e fig.4. As concentrações de U derivadas do aerolevantamento mostram-se sempre inferiores àquelas obtidas no PMA. Além disso, as medidas de concentração de U, no mesmo ponto georeferenciado, mostram uma faixa de maior amplitude quando comparada com a variação das medidas de Th. O ponto 42 apresentou concentrações mais próximas, enquanto que o ponto 10 foi o que apresentou maior amplitude. Isto pode ser explicado pelo fato deste último se encontrar numa direção preferencial dos ventos a partir da cava da mina, que pode trazer uma contribuição na radioatividade devida ao transporte de aerossóis. Essa contribuição só se verifica a partir do início da atividade de mineração em 2000. As concentrações de Th aparecem quase sempre na mesma faixa de variação. Isto pode ser devido ao comportamento geoquímico do tório, geralmente de natureza detrítica, o que implica em baixa taxa de remobilização ao longo do tempo. As concentrações de U e Th, no ponto 42, podem estar sendo influenciadas por processos hidrogeoquímicos. A

fig.2 mostra a existência de um curso d'água adjacente a esse ponto. Sendo assim, ambos os radionuclídeos apresentam um comportamento detrítico, uma vez que a fração solúvel tende a ser carregada durante as chuvas. Por isso, como a origem de ambos é a mesma, ou seja, ligada à erosão das vertentes e deposição colúvio-aluvionar com lenta taxa de remobilização, a comparação entre esses dados mostra valores mais próximos.

O gráfico comparativo das medidas de taxa de dose (PMA da URA e Espectrometria-gama aérea) é apresentado na fig. 5. Em média as taxas de dose dos TLDs mostram-se 21% superiores às medidas do levantamento aerogeofísico, sendo que a taxa de dose média nos pontos comparados foi de  $70 \text{ nGy.h}^{-1}$  (Espectrometria-gama aérea) e  $85 \text{ nGy.h}^{-1}$  (TLDs). Esta discrepância pode estar refletindo o fato de as medidas dos TLDs serem realizadas a 1 m do solo, e consequentemente, possuírem uma maior contribuição de raios gama advindos do decaimento do radônio. Entretanto, considerando-se toda a área do Projeto São Timóteo, a taxa de dose alcançou valores de até  $275 \text{ nGy.h}^{-1}$ , com média de  $61 \text{ nGy.h}^{-1}$ , como mostra o mapeamento da taxa de dose exibido na fig.6.

O ponto de amostragem 7 foi o único em que a taxa de dose derivada do levantamento aerogeofísico foi superior a medida de TLD ( $\approx 7\%$ ). Neste ponto, os dados do PMA mostram valores elevados de radônio, os quais não podem ser relacionados à mineração, uma vez que não estão na direção predominante dos ventos em relação aos principais termos-fonte da instalação. Adicionalmente, o ponto 7 está posicionado próximo a uma região de descarga de vários córregos (e.g. córrego cachoeira, córrego do morro, córrego do barbeiro etc.), onde existem terraços aluviais que constituem um depósito para os diversos tipos de materiais que sofreram erosão a montante. Assim, é possível que estes solos possuam concentrações mais elevadas de U e, principalmente, de  $^{226}\text{Ra}$  que aumentem a taxa de exalação de  $^{222}\text{Rn}$ . Conseqüentemente, nesta área também se registram os maiores níveis de taxa de dose do levantamento aerogeofísico, cujos valores podem ser considerados similares às medidas de TLD (diferença  $< 10\%$ ), considerando o largo período decorrido entre as duas medidas.

Os pontos 01, 43, 44, 299 estão situados em zonas urbanas e encontram-se praticamente circunscritos pelos povoados de Maniaçú, São Timóteo, Lagoa Real e Caetité, respectivamente. Na espectrometria-gama aérea, zonas urbanas possuem diversos elementos que funcionam como blindagem no fluxo dos raios gama (e.g. ruas asfaltadas e casas). Isto pode ser observado principalmente nas medidas de taxa de dose dos pontos 01 e 44, que decrescem praticamente pela metade conforme mostra o gráfico da fig.5.

### Conclusão

Apesar das técnicas empregadas para se obter os dados de concentração e taxa de dose serem de natureza diferente e o período decorrido entre os dados obtidos no PMA e no Projeto São Timóteo ser de quase 25 anos, os resultados indicam valores de mesma ordem de

grandeza. No caso dos dados de concentração, os resultados sugerem a identificação de uma provável contribuição de fontes de urânio provenientes da mineração, através da deposição de aerossóis. As medidas de taxa de dose absorvida no ar, considerando toda a região do Projeto São Timóteo, mostram uma concordância com a média global de taxa de dose absorvida para ambientes exteriores que é de  $59 \text{ nGy.h}^{-1}$  (UNSCEAR, 2000). Além disso, medidas de *KERMA* no ar (a 1 m do solo) realizadas na região do Planalto de Poços de Caldas-MG por (Sachett, 2001), considerada uma área com níveis de radioatividade natural elevada, mostram valores variando dentro da faixa obtida para a região do Projeto São Timóteo, ou seja, de  $67\text{-}245 \text{ nGy.h}^{-1}$ .

### Agradecimentos

À Comissão de Energia Nuclear – CNEN que, através da Companhia de Recursos Minerais – CPRM, forneceu os dados do aerolevamento; ao Programa de Pós-Graduação do IRD pelo apoio para a realização deste trabalho e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ, pela concessão da bolsa de mestrado à E.F.S.S.

### Referências

- Attix, F.H., 1986, Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, Jonh Wiley & Sons, EUA.
- BARMP, 1997, Brazil Airborne Radiometric Mapping Project, Technical Report and Survey Atlas, Ottawa, Canada.
- Dickson, B. L. & Scott, K.M., 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys – adding the geochemical factors. In: AGSO Journal of Australian Geology; Geophysics, Austrália, Vol.17, Nº. 2, 187-200.
- Grasty R.L., Holman P.B. and Blanchard Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. Geological Survey of Canada, Paper 90-23, 25 p.
- Hildebrand, J.D., 2004, Aerogeofísica no Brasil e a Evolução das Tecnologias nos últimos 50 anos, I Simpósio de Geofísica da SBGf, Fugro-Lasa Airborne Surveys, São Paulo, 8 p.
- IAEA (TECDOC 1363), 2003, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA, Viena, Austria.
- Sachett, I. A., 2001, Caracterização da Radiação Gama Ambiental em Áreas Urbanas Utilizando uma Unidade Móvel de Rastreamento, Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 195 p.
- UNSCEAR, 2000, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Vol. I, Sources, Annex B; Exposures from natural radiation sources, p. 90.

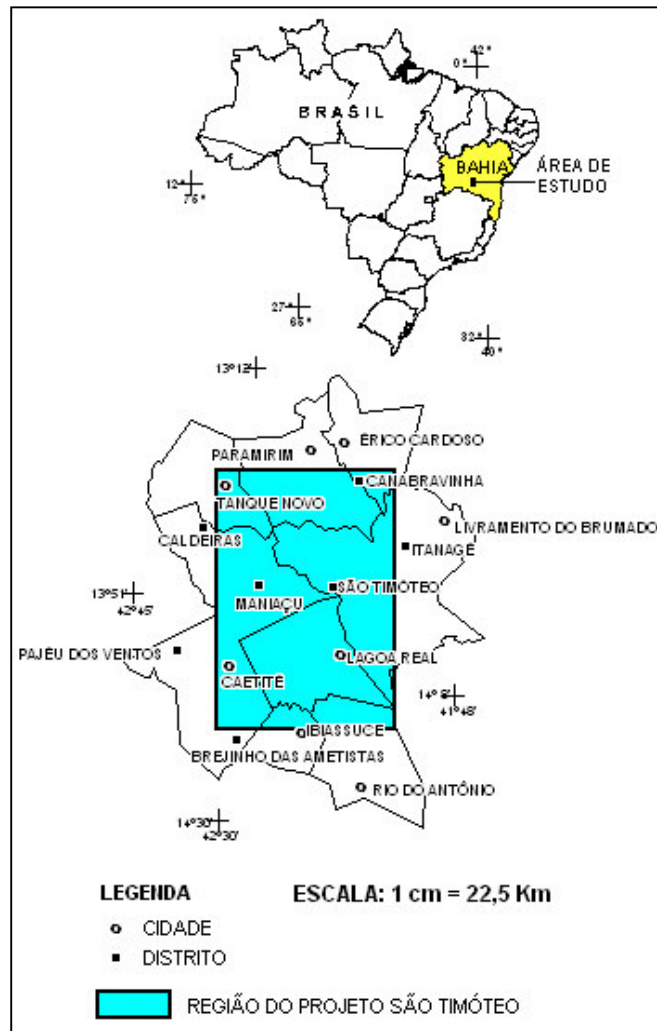


Fig.1 – Mapa da localização da área abrangida pelo levantamento aerogeofísico do Projeto São Timóteo.

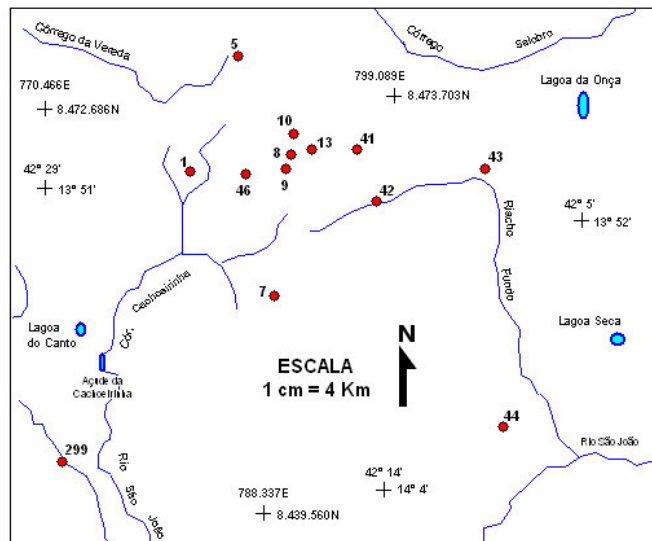


Fig.2 - Mapa da localização dos pontos de amostragem do PMA da URA (coordenadas UTM zona 23S)

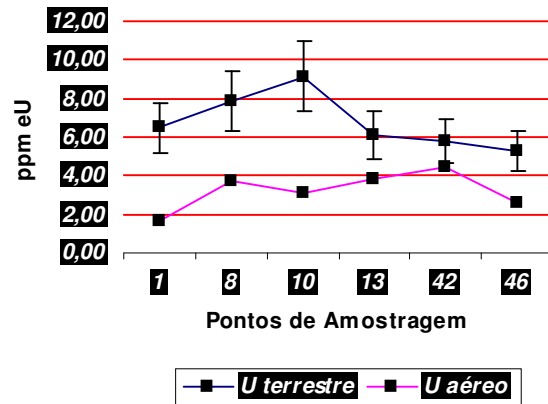


Fig.3 – Concentrações de urânio medidas nos pontos de amostragem (1, 8, 10, 13, 42, 46) do PMA e estimativas correspondentes obtidas no levantamento aerogeofísico.

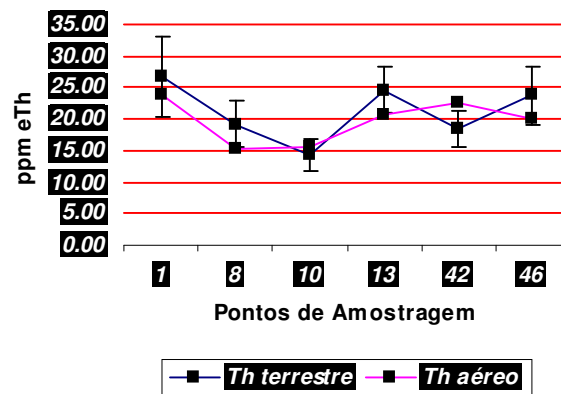


Fig.4 – Concentrações de tório medidas nos mesmos pontos de amostragem (1, 8, 10, 13, 42, 46) do PMA e correspondentes estimativas obtidas no levantamento aerogeofísico.

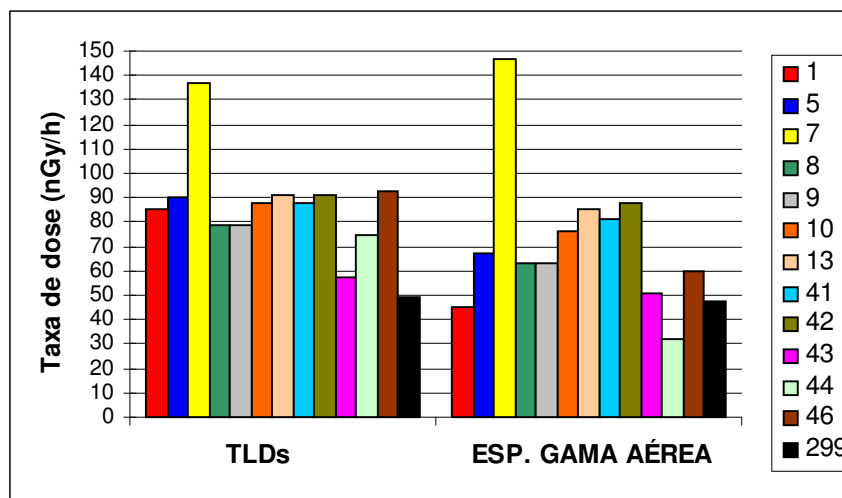


Fig.5 – Gráfico comparando as medidas de taxa de dose absorvida no ar (TLDs x Espectrometria Gama Aérea).



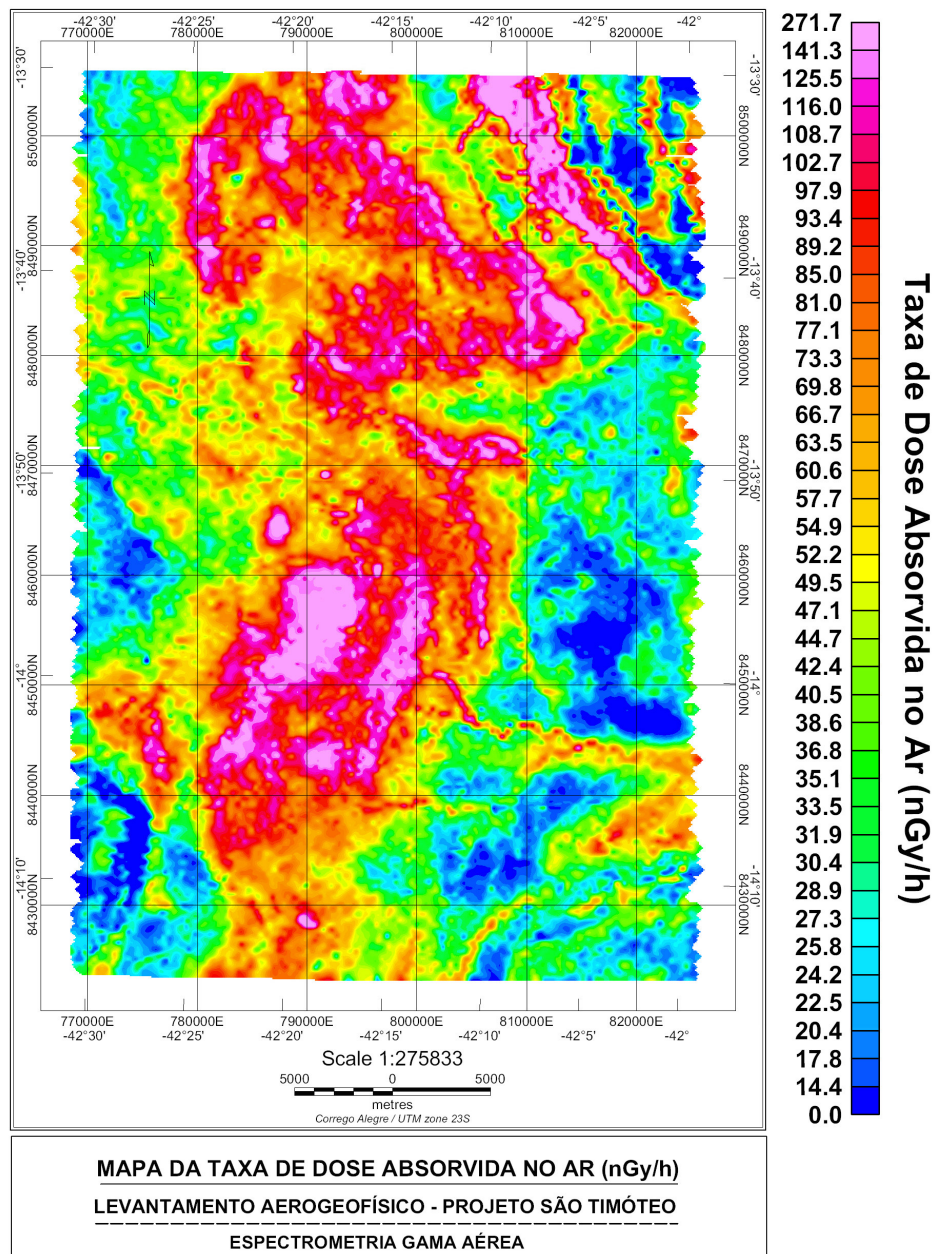


Fig.6 – Mapa da Taxa de Dose Absorvida no Ar calculada a partir dos dados do aerolevanteamento do Projeto São Timóteo.

Tabela 1 – Coeficientes de sensibilidade para os canais do K, U, Th e CT.

K	U	Th	CT
(cps)/(‰K)	(cps)/(ppm eU)	(cps)/(ppm eTh)	(cps)/( μR/h)
23	6,6	1,7	55